

## МОДЕЛИ И АЛГОРИТМЫ АВТОМАТИЗАЦИИ СИСТЕМ МОНИТОРИНГА ЗДАНИЙ И СООРУЖЕНИЙ СТРОИТЕЛЬНЫХ ОБЪЕКТОВ

Лысенко И.В., доктор технических наук

*Требования к автоматизации систем мониторинга инженерно-технических конструкций зданий и строительных сооружений объектов, установленные ГОСТ Р 22.1.12-2005, не могут быть выполнены в полном объёме по причине недостаточной проработанности методического аппарата оценивания как динамических характеристик объектов, так и характеристик объектов, непосредственно связанных с количественным подсчётом вероятности обрушения здания для рассматриваемого интервала времени. В настоящей статье рассматриваются алгоритмы, позволяющие автоматизировать технологический процесс мониторинга в полном объёме до уровня, не требующего участия человека-оператора. Основное внимание уделено двум аспектам автоматизации. 1. Разработке программы мониторинга и методики её реализации. 2. Разработке алгоритма автоматизированного определения частот собственных колебаний объектов мониторинга, без которого не представляется возможным проведение автоматизированных вычислений всех интересующих показателей динамики объекта.*

**Ключевые слова:** мониторинг, датчик, программа, параметр, частота колебаний, алгоритм, модель.

## MODELS AND ALGORITHMS FOR AUTOMATION OF SYSTEMS FOR MONITORING OF CONSTRUCTION OBJECTS

Lysenko I.V., doctorate degree in technical sciences

*Requirements for automation of monitoring systems of engineering and technical buildings and other construction objects established by GOST R 22.1.12-2005 could not be fully implemented due to the lack of thoroughness of the methodological apparatus of evaluation of both dynamic characteristics of objects and characteristics of objects directly related to the quantitative calculation of the probability of a collapse of a building for the considered time interval. This article covers algorithms allowing to automate the process of monitoring in a whole to a level requiring no participation of human operator. The emphasis is made on two aspects of automation. 1. Developing a monitoring program and methods of its implementation. 2. Developing automated algorithms determining natural frequencies of monitoring facilities, without which it is not possible to perform automated calculation of considered indicators of the object dynamics.*

**Keywords:** monitoring, sensor, software, parameter, oscillation frequency, algorithm, transport infrastructure.

**1. Общие условия проведения мониторинга.** Система мониторинга – совокупность технических средств, предназначенных для регистрации и измерения различных параметров, включая накопление и обработку поступающей информации индивидуально для конкретного объекта.

Согласно ГОСТ Р 22.1.12-2005 в отношении данной системы применяется термин «структурированная система мониторинга и управления инженерными системами зданий и сооружений» (СМИС). Объектами контроля и управления СМИС являются подсистемы жизнеобеспечения и безопасности, а также инженерно-технические конструкции (конструктивные элементы) зданий и строительных сооружений объектов транспортной инфраструктуры.

В настоящей статье рассматриваются вопросы, касающиеся непрерывного или периодического тестирования при помощи цифровых датчиков-акселерометров состояния конструкций и здания в целом для своевременного отслеживания и устранения угрозы возникновения аварийных и опасных ситуаций. В связи с этим при дальнейшем рассмотрении системы мониторинга ограничимся исследованием только этого круга задач.

С технической точки зрения цели мониторинга зданий и сооружений могут быть сформулированы следующим образом:

1) оценка реального текущего технического состояния зданий и сооружений в условиях штатных микросейсмических, техногенных и атмосферных воздействий для выдачи рекомендаций диспетчерским службам по дальнейшей эксплуатации и ремонту;

2) уточнение проектных значений характеристик зданий и сооружений по результатам оценки состояния в реальных условиях эксплуатации;

3) выдача рекомендаций эксплуатирующим и проектным организациям по разработке программ, построению систем мониторинга, совершенствованию нормативной документации в области строительства.

Первая цель достигается методом оценки и прогнозирования техниче-

ских характеристик зданий и сооружений по результатам измерений статических, кинематических и динамических параметров состояния. В качестве оцениваемых характеристик могут использоваться тренды в изменении частот форм собственных колебаний, логарифмических декрементов затухания и др.

Основной метод достижения второй цели – проверка адекватности расчётных математических моделей, используемых в проектировании зданий и сооружений, реальным условиям эксплуатации. В качестве исходных данных для её решения могут использоваться статистики технических характеристик зданий и сооружений по результатам наблюдений за период мониторинга. Результатами её решения являются подходящие опытно-теоретические оценки этих характеристик. Необходимость её реализации в системах мониторинга зданий и сооружений обусловлена следующими обстоятельствами:

- проектные (расчётные) значения динамических характеристик здания определяются по приближённым моделям и эмпирическим зависимостям, которые не всегда полно учитывают внешние факторы (не являются адекватными реальным условиям);

- динамические характеристики зданий изменяются с течением времени под воздействием внешних возмущающих факторов (микросейсмических, техногенных, атмосферных);

- в каждом сеансе мониторинга влияние внешних факторов различно и оценки динамических характеристик являются случайными величинами (статистиками), не отражающими реальной картины правильности принятых проектных решений и действительного состояния здания при их единичном использовании;

- измерения, используемые в ходе оценивания динамических характеристик здания, искажены случайными погрешностями, статистические характеристики которых в общем случае неизвестны.

Анализ известных публикаций, например, [1-4, 5-8], показывает, что разработчики методов и систем мониторинга не в полной мере учитывают

данные условия. В основу методического обеспечения систем мониторинга, как правило, закладывается идея простого сравнения текущих динамических параметров зданий и сооружений с расчётными (проектными) значениями. Далее вычисляются обобщённые показатели износа здания. С точки зрения математической статистики реализация идеи простого сравнения текущего значения характеристики с расчётным, связана с возрастанием вероятностей ошибок как первого, так и второго рода [9]. Поэтому учёт отмеченных условий на этапе разработки систем мониторинга представляется актуальным.

Нами разработана функциональная модель программного обеспечения системы мониторинга на основе системно-технологического подхода. В настоящей статье будем касаться только отдельных её фрагментов, которые, по мнению автора, являются ключевыми.

**2. Структура программы мониторинга.** Предложения по формированию программы мониторинга, учитывающей рассмотренные выше условия, представлены на рис. 1.

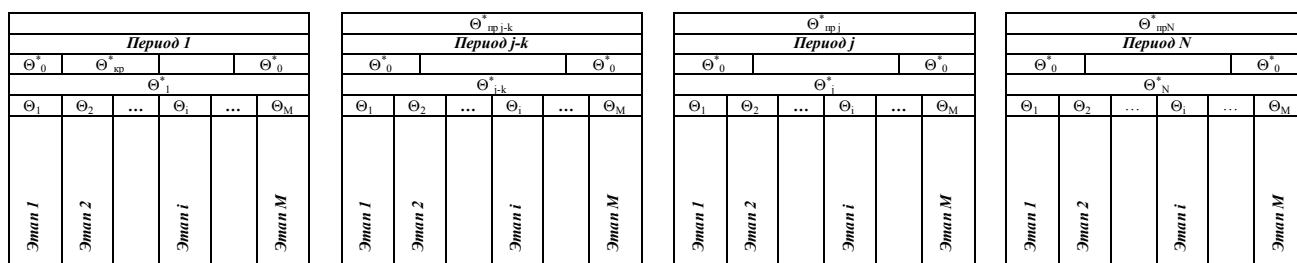


Рис. 1.

На рис. 1 приняты следующие обозначения:

-  $\Theta_0^*$  – подходящее опытно-теоретическое (текущее) значение характеристики объекта, полученное по результатам  $j$ -го периода мониторинга. До начала первого периода принимается равным проектному значению характеристики и далее уточняется;

-  $\Theta_j^*$  – оценка характеристики, полученная по результатам  $j$ -го периода мониторинга (по  $M$  данным  $\Theta_i$   $i$ -ых этапов,  $i=1, \dots, M$ );

-  $\Theta_{пр j}^*$  – прогнозируемое по  $\Theta_1^*, \dots, \Theta_{j-1}^*$  значение характеристики на дату  $j$ -го периода. Используется для принятия решения о дальнейшей эксплуатации объекта и планирования ремонтных работ;

-  $\Theta_i$  – значение характеристики, полученное по данным измерений  $i$ -го этапа мониторинга в  $j$ -ом периоде;

-  $\Theta_{кр}^*$  – критическое значение характеристики, при котором дальнейшая эксплуатация объекта должна быть прекращена. Определяется проектной организацией и используется для формирования сигнала тревоги.

Содержание программы обосновывается, исходя из общих условий, рассмотренных выше, и следующих соображений:

1) объект мониторинга находится под постоянным воздействием большого числа возмущений геофизического (микросейсмического, атмосферного и др.) и техногенного характера. Эти возмущения носят случайный характер и их однозначное повторение от одного сеанса измерений к другому невозможно. Поэтому динамические характеристики объекта, полученные по данным конкретного сеанса измерений, носят случайный характер и являются реализациями неизвестных истинных значений характеристик. В силу центральной предельной теоремы закон распределения таких реализаций можно считать примерно нормальным;

2) динамические характеристики объекта постоянно эволюционируют во времени в силу естественных изменений в элементах конструкции объекта, причём значимые изменения относятся к достаточно продолжительному временному периоду;

3) проектные значения характеристик, вычисляемые, как правило, по приближённым полуэмпирическим зависимостям, хотя и являются неслучайными, сами носят приближённый характер. Поэтому простое сравнение опытной реализации с допуском возможно только в исключительных критических ситуациях;

4) в рамках одного периода мониторинга динамические характеристики объекта относительно стабильны, т.е. имеют незначительный разброс от эта-

па к этапу. Данный разброс обусловлен незначительными вариациями возмущений и условий проведения измерений.

Мониторинг объекта в соответствие с предложенной программой организуется следующим образом.

1. Программой предусмотрена периодичность мониторинга с целью, определения оценок текущих значений динамических характеристик объекта  $\Theta_j^*$ . Полученные оценки используются для проверки согласия их расчётных или полученных на предыдущих этапах мониторинга значений  $\Theta_0^*$  с опытными данными. Если  $\Theta_0^*$  согласуется в статистическом смысле с  $\Theta_j^*$ , то она принимается в качестве текущего значения динамической характеристики, указываемой в отчётных материалах. В противном случае  $\Theta_0^*$  корректируется.

Продолжительность каждого  $j$ -го периода целесообразно принимать соответствующей условному делению года (зима – лето или зима – весна – лето – осень, исходя из соображений стабильности температуры, состояния грунта и т.д.).

2. В рамках каждого периода предполагается проведение измерений за  $M$  этапов, каждый из которых предполагает получение реализаций оценок динамических характеристик  $\Theta_1$  по данным измерений. По полученным реализациям вычисляются оценки  $\Theta_j^*$ , а также контролируется отсутствие на объекте предпосылок аварийной или опасной ситуации путём сравнения с  $\Theta_{кр}^*$ .

В отношении периодичности повторения каждого этапа существуют различные мнения специалистов, от организации непрерывного мониторинга до нескольких недель или месяцев. По продолжительности этапа – от единиц до нескольких десятков минут.

3. В целях принятия решений о дальнейшей эксплуатации объекта и планирования ремонтных работ предусматривается прогнозирование динамических характеристик на заданную дату, по их текущим значениям, оценённым в  $j$ -ых периодах на протяжении жизненного цикла.

### **3. Алгоритм автоматизированного определения частот собствен-**

**ных колебаний объектов мониторинга.** Для достижения целей мониторинга зданий и сооружений используются измерения проекций линейного ускорения в точке установки датчика-акселерометра на три ортогональные оси, связанные с объектом,  $\ddot{W}_x, \ddot{W}_y, \ddot{W}_z$ .

Результатами измерений параметров продольных, поперечных и вертикальных колебаний объекта, зарегистрированных приборами, являются аддитивно связанные независимые колебания  $x(f_n)$ ,  $\mathbf{x} = \left[ \ddot{W}_x, \ddot{W}_y, \ddot{W}_z \right]^T$  на частотах собственных форм  $f_n, n = \overline{0, N}$ . Аддитивная сумма колебаний объекта на частотах собственных форм может быть представлена в виде ряда Фурье (или иной полиномиальной модели) с конечным числом слагаемых.

Полезный сигнал  $a_x, a_y, a_z$ , содержащий информацию о собственных колебаниях объекта под воздействием возмущений геофизического и техногенного характера (или динамической нагрузки), из измерений  $\ddot{W}_x, \ddot{W}_y, \ddot{W}_z$  на интервале  $[t_0, t_k]$  выделяется центрированием исходных измерений

$$\begin{aligned} a_x &= \ddot{W}_x - \overline{\ddot{W}_x}, a_y = \ddot{W}_y - \overline{\ddot{W}_y}, a_z = \ddot{W}_z - \overline{\ddot{W}_z}, \\ \overline{\ddot{W}_x} &= \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k \ddot{W}_{xi}, \overline{\ddot{W}_y} = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k \ddot{W}_{yi}, \overline{\ddot{W}_z} = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k \ddot{W}_{zi}. \end{aligned} \quad (1)$$

Необходимость операции (1) обусловлена тем, что данные измерений  $\ddot{W}_x, \ddot{W}_y, \ddot{W}_z$  датчика-акселерометра, установленного на условно неподвижном основании содержат проекции вектора силы тяжести  $\mathbf{g}$ .

Далее строятся Фурье-образы последовательностей  $a_x, a_y, a_z$  для каждой  $l$ -ой точки установки прибора:

$$\mathbf{X}(t) = \frac{1}{\sqrt{N}} \sum_{n=0}^{N-1} \mathbf{x}_n \cdot e^{-i \cdot \frac{(2\pi \cdot t)}{N} \cdot n}, \quad (2)$$

где  $\mathbf{x}_n = [a_x \ a_y \ a_z]$ .

В формуле (2) положено, что дискретным отсчётам зарегистрирован-

ных данных по времени  $t$  на интервале  $[t_0, t_k]$  соответствуют индексы  $n = \overline{0, N-1}$ .

На основе (2) определяются амплитудочастотные характеристики (АЧХ)  $\{\mathbf{X}(t), \mathbf{f}_n\}$  последовательностей  $a_x, a_y, a_z$ :

$$|\mathbf{X}(t)| = [\operatorname{Re}^2(\mathbf{X}(t)) + \operatorname{Im}^2(\mathbf{X}(t))]^{1/2}, \quad (3)$$

Частоты определяются следующим образом:

$$f_n = \frac{t}{N} \cdot n, \quad (4)$$

Идентификатор  $t$  текущего дискретного отсчёта времени в формуле (4) эквивалентен номеру отсчёта.

Определение собственных частот колебаний объекта в каждой  $l$ -ой точке установки приборов по амплитудно-частотной характеристике (АЧХ) выполняется в следующей последовательности:

- сглаживание АЧХ последовательностей  $a_x, a_y, a_z$  многочленной моделью;
- определение глобального и наиболее значимых локальных максимумов функции, аппроксимирующей АЧХ (глобальный максимум соответствует частоте основного тона, локальные – обертонам);
- оценка среднеквадратического отклонения (СКО) собственных частот.

Для сглаживания АЧХ, как показывают результаты численных экспериментов, наилучшим образом подходят локально-сплайновые модели третьей степени гладкости в виде:

$$X(t) = \sum_{j=1}^J x_j \varphi_j(t). \quad (5)$$

Коэффициенты многочлена  $x_j$  оцениваются методом наименьших квадратов [10].

Реализация операции сглаживания позволяет достаточно корректно определить все локальные максимумы АЧХ объекта и оценить частоты  $f_0$  ос-



новного тона и наиболее значимых обертонов  $f_k, k = 1, 2, \dots, K, K \ll N$  собственных форм колебаний объекта. В качестве частоты основного тона  $f_0$  принимается ближайшая к нулевой частота, которой соответствует максимальная амплитуда колебаний  $|\mathbf{X}(t)|$ . Частоты обертонов  $f_k$  расположены правее от неё на числовой оси частот в порядке убывания амплитуд. При этом используется необходимое условие экстремума функции в точке  $\frac{\partial}{\partial x}(t) = \sum_{j=1}^n \frac{\partial}{\partial \varphi_j}(t) x_j = 0$  и критерий изменения знака производной с плюса на минус  $\left\{ \left| \frac{\partial}{\partial x}(t - \Delta t) \right| \cdot \left| \frac{\partial}{\partial x}(t) \right| < 0, \left| \frac{\partial}{\partial x}(t - \Delta t) \right| > 0 \right\}$ . По вариации АЧХ в точках максимума  $|\mathbf{X}(t)| - \sigma_{|\mathbf{X}(t)|}$ , соответствующих частотам  $f_0, f_k$ , также оцениваются и вариации собственных частот  $f: [\underline{f}, \bar{f}]$  (см. рис. 2). СКО собственной частоты определяется по формуле:

$$\sigma_{f_k} = (\bar{f}_k - \underline{f}_k) / 2. \quad (6)$$

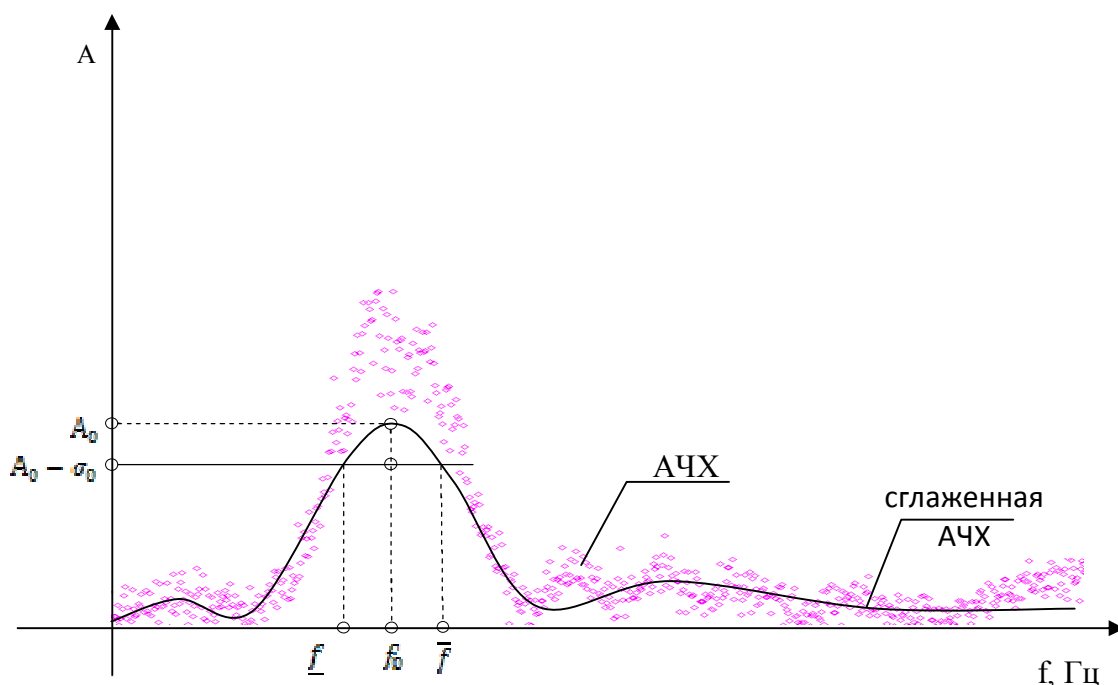


Рис. 2

**4. Экспериментальный анализ применения алгоритма автоматизированного определения частот собственных колебаний объектов мониторинга.** В целях апробации полученных теоретических результатов и оценки возможности применения алгоритма автоматизированного определения частот собственных колебаний в составе СМИС были проведены экспериментальные исследования по оценке характеристик собственных колебаний ряда зданий. Проиллюстрируем результаты экспериментов на примере административного здания (адрес: г. Москва, Старый Петровско-Разумовский проезд, д. 10). Характеристики здания: количество этажей – 5, протяжённость здания в направлении большой оси – 19,13 м, малой оси – 14,13 м, высота здания – 18,27 м. Расчётная оценка периода собственных колебаний здания составляет – 0,176 сек, логарифмического декремента 0,165. Для сокращения количества рисунков записи виброграмм и АЧХ приведены только для вертикальной оси здания.

На рис. 3 представлена запись виброграммы собственных колебаний здания в направлении вертикальной оси, зафиксированная на пятом этаже. Оси прибора ориентированы параллельно соответствующим осям здания. Измерения проводились 13.08.07 г. в 13.30. На рис. 4 показана соответствующая ей АЧХ. Результаты определения характеристик собственных колебаний и их СКО приведены в таблице 1.

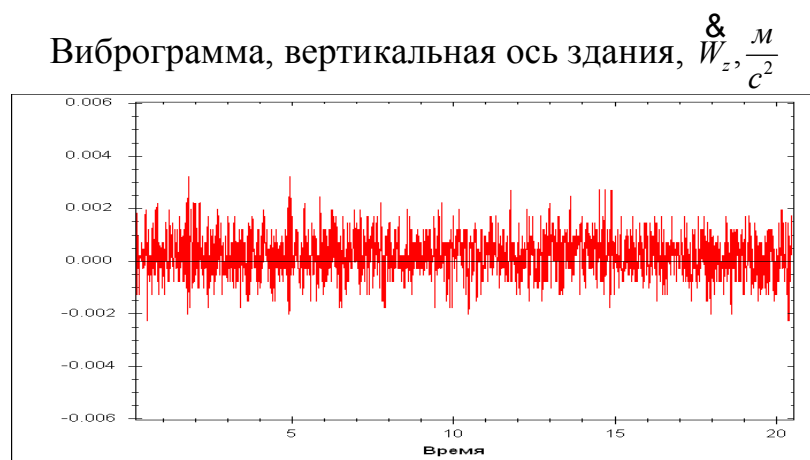


Рис. 3.

АЧХ, вертикальная ось здания ( $\times 10^{-6}, \frac{M}{c^2}$ )

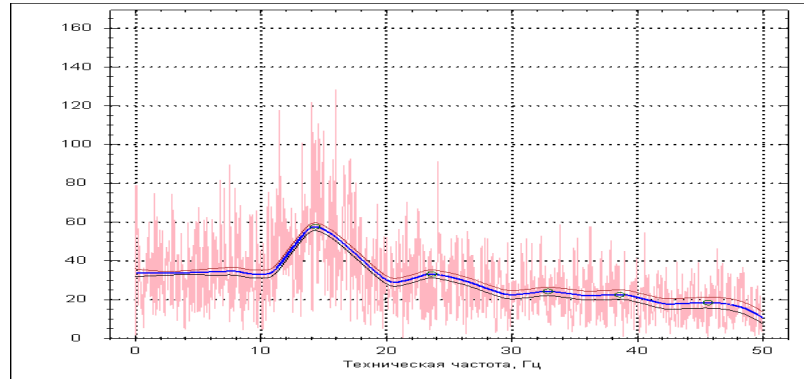


Рис. 4.

Таблица 1. Характеристики собственных колебаний здания в естественных условиях

	Оси здания		
	большая	малая	вертикальная
Частоты основного тона собственных колебаний, Гц	14.1113	14.4043	14.3555
СКО частоты, Гц	0.4883	1.5137	0.7813
Период основного тона собственных колебаний, сек	0.0709	0.0694	0.0697
СКО периода, сек	0.0025	0.0074	0.0038
Логарифмический декремент затухания	0.9931	2.44799	2.45299
СКО декремента	0.2207	1.6805	0.7654

Записи показаний прибора в этой же точке после динамического возбуждения (удара) представлены на рис. 5, соответствующие им АЧХ – на рис. 6, характеристики собственных колебаний здания – в таблице 2.

Виброграмма, вертикальная ось здания,  $\frac{M}{c^2}$

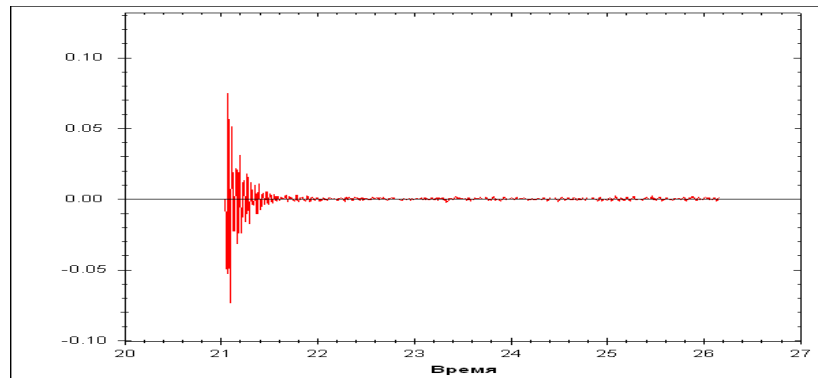


Рис. 5

АЧХ, вертикальная ось здания ( $\frac{M}{c^2}$ )

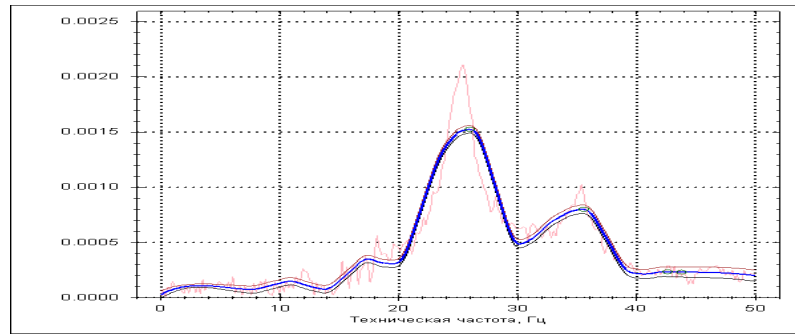


Рис. 6

Таблица 2. Характеристики собственных колебаний здания при динамическом нагружении

	Оси здания		
	большая	малая	вертикальная
Частоты основного тона собственных колебаний, Гц	14.4531	14.2578	25.9766
СКО частоты, Гц	0.5859	0.4883	0.8789
Период основного тона собственных колебаний, сек	0.0692	0.0701	0.0384
СКО периода, сек	0.0028	0.0024	0.0013
Логарифмический декремент затухания	0.9494	1.1509	0.3881
СКО декремента	0.1152	0.1076	0.1049

На рис. 7 представлены записи показаний прибора после успокоения элементов конструкции, на рис. 8 – построенные по ним АЧХ, в таблице 3 – характеристики собственных колебаний здания.

Виброграмма, вертикальная ось здания,  $\frac{W_x}{c^2}$

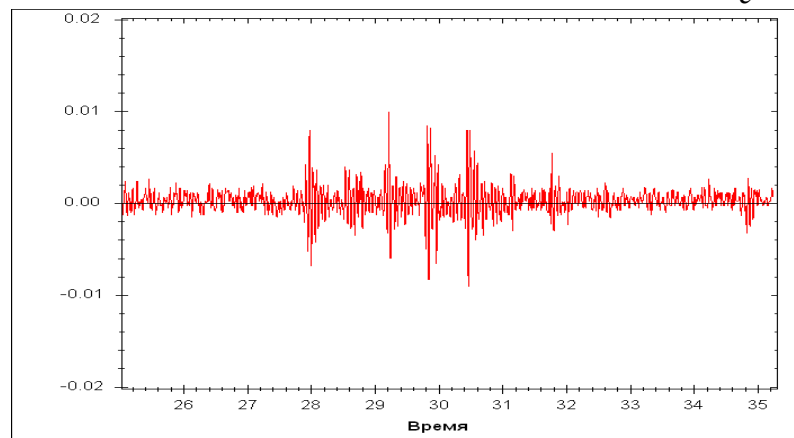


Рис. 7

АЧХ, вертикальная ось здания ( $\times 10^{-6}, \frac{M}{c^2}$ )

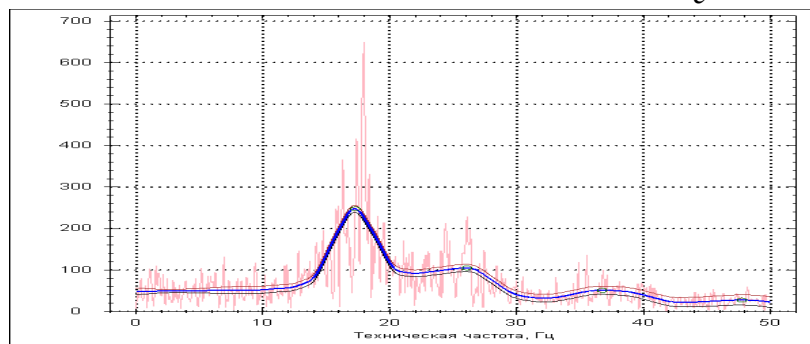


Рис. 8

Таблица 3. Характеристики собственных колебаний здания после динамического нагружения

	Оси здания		
	большая	малая	вертикальная
Частоты основного тона собственных колебаний, Гц	14.2578	16.9922	17.2852
СКО частоты, Гц	0.5371	0.5859	0.5371
Период основного тона собственных колебаний, сек	0.0701	0.0589	0.0579
СКО периода, сек	0.0026	0.002	0.0018
Логарифмический декремент затухания	2.3422	0.196	0.8164
СКО декремента	0.3011	0.0435	0.1483

Результаты вычисления АЧХ колебаний (см. рис. 3, 5, 7) и результаты определения частот основного тона собственных колебаний (см. табл. 1-3) свидетельствуют о правильности принятых теоретических положений и достаточно устойчивой работе разработанного алгоритма и программ. При этом смещение частоты основного тона собственных колебаний вдоль вертикальной оси здания в высшую область, при динамическом нагружении, полностью согласуется с известными физическими представлениями о колебаниях строительных конструкций. Вместе с тем, значительное СКО определения частот собственных колебаний здания от 0,5 до 1,5 Гц, а также разброс в определении логарифмического декремента затухания колебаний говорят о недостаточной точности измерения ускорений для целей мониторинга. По предварительным оценкам должна обеспечиваться точность измерения ускорений с СКО не хуже  $0,005 \text{ м/с}^2$ . В настоящее время на новых приборах она нами достигнута.

**5. Выводы.** В настоящей статье представлены алгоритмы из состава разработанной нами функциональной модели СМИС, позволяющие автоматизировать технологический процесс мониторинга зданий и строительных сооружений, впервые полностью исключив участие человека-оператора из процессов анализа динамических характеристик объекта и принятия решений. Разработанные алгоритмы более объективно по сравнению с существующими ([7] и другие) учитывают условия проведения мониторинга, что позволяет избежать дорогостоящих ошибок.

### Список использованной литературы

1. Обозов В.И., Мамаева Т.В. Анализ динамических характеристик крупнопанельных зданий. – М.: ФГУП НИЦ «Строительство», ЦНИИСК им. В.А. Кучеренко, 2009.
2. Заренков В.А. и др. Современные методы технической диагностики. – СПб.: РДК-принт, 2000.
3. Гурьев В.В., Дорофеев В.М.. Особенности диагностики технического состояния несущих конструкций высотных зданий // Уникальные и специальные технологии в строительстве, 2004. – № 1.
4. Селезнев В.С.; Еманов А.Ф.; Барышев В.Г.; Кузьменко А.П. Патент Российской Федерации RU2140625. Способ определения физического состояния зданий и сооружений. – Новосибирск: Институт вычислительной математики и математической геофизики, 1998.
5. Савин С.Н., Шевченко Н.И. Строительный мониторинг исторических зданий. Технологии и оборудование // СтройПРОФИль, 2007. – № 2.
6. Острецов В.М., Гендельман Л.Б., Вознюк А.Б., Капустян Н.К. Инструментальное измерение ветровых колебаний высотных зданий // Жилищное строительство», 2005. – № 9.
7. Шахраманьян А.М. Модели и алгоритмы проектирования и функционирования систем дистанционного мониторинга технического состояния зданий и сооружений. Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук. – М., 2005.
8. Григорьев Ю.П., Гурьев В.В., Дмитриев А.Н., Дорофеев В.М., Степанов А.Ю. Патент Российской Федерации RU2292433. Способ определения изменений напряженно-деформированного состояния конструкций здания или сооружения сложной пространственной формы. – М.: ГУП МНИИТЭП, 2005.
9. Кендал М., Стьюарт А. Статистические выводы и связи. Пер. с англ. – М.: Наука, 1973. – 590 с.
10. Форсайт Дж., Малькольм М., Моулер К. Машинные методы математических вычислений. – М.: Мир, 1980. – 280 с.